

锻造对 12Cr2Ni4A 钢棒料性能的影响

于 淼

(航空工业金城南京机电液压工程研究中心, 江苏 南京 211106)

摘要: 齿轮由于原材料存在大尺寸脆性夹杂物会产生连续疲劳断裂, 为了研究锻造对夹杂物的分布和材料力学性能的影响, 采用了金相、冲击、扫描电镜及能谱微区分析等方法, 对问题原材料锻造后的夹杂物分布、冲击性能、断口形貌等进行了分析, 并与正常原材料进行了比对。结果表明: 经过锻造, 夹杂物的分布明显改善, 条状夹杂物已破碎, 未见大尺寸超标夹杂物, 夹杂物呈弥散分布, 评级符合标准要求; 材料的横向冲击性能改善效果显著, 提升幅度达到 75%。经试验和分析得出: 经锻造后, 棒料的夹杂物分布和冲击性能已达到正常原材料的水平, 可满足齿轮的使用要求。

关键词: 齿轮; 疲劳; 夹杂物; 锻造; 冲击性能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.04.009

中图分类号: TG123.32

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 04-0074-04

Influence of forging on properties of 12Cr2Ni4A steel bar

Yu Miao

(AVIC Jincheng Nanjing Engineering Institute of Aircraft Systems, Nanjing 211106, China)

Abstract: Continuous fatigue fracture can be formed in gears because of the large-sized brittle inclusions existing in raw materials. Therefore, in order to study the influence of forging on the distribution of inclusions and the mechanical properties of materials, the inclusions distribution, impact properties and fracture morphology of raw materials with problems after forging were analyzed by metallography, impact, SEM and EDS, which were analyzed and compared with the normal raw materials. The results show that after forging, the distribution of inclusions is improved significantly, the strip inclusions are broken, the oversized inclusions disappear, the inclusions are distributed diffusely, and the rating meets the standard requirements. The lateral impact properties of the material are improved significantly and increased by 75%. The conclusion after testing and analysis shows that after forging, the inclusions distribution and the impact properties of the bar reach the level of the normal raw materials, which meet the using requirements of gear.

Key words: gear; fatigue; inclusions; forging; impact properties

齿轮在使用过程中陆续发生数起早期断齿故障, 故障齿轮的宏观形貌如图 1 所示。该齿轮由 12Cr2Ni4A 钢棒料 (直径为 $\Phi 60$ mm) 直接加工而成, 经渗碳处理。经故障分析发现, 是由于齿轮心部存在大尺寸夹杂物而造成了早起疲劳断裂。此批原材料采购时未明确冶炼方法, 厂家提供的是电炉钢, 对夹杂物未严格控制。针对这一问题, 尝试通过锻造加工来改善原材料的夹杂物分布, 进而避免齿轮发生疲劳断裂。取同批原材料经锻造生产了另一型齿轮, 锻造工艺为: 下料—镦粗至直径为 $\Phi 70$ mm—拔长至直径为 $\Phi 45$ mm, 锻造比为 3.8。对锻造后的原材料的夹杂物分布、冲击



图 1 故障齿轮宏观形貌

Fig. 1 Macro morphology of fault gear

性能断口形貌进行分析, 研究了锻造对原材料性能的改善效果, 并给出了所生产的另一型齿轮的使用建议。

收稿日期: 2021-04-09; **修订日期:** 2021-07-08

作者简介: 于 淼 (1981-), 男, 学士, 正高级工程师

E-mail: 3436667625@qq.com

1 检测及试验结果

1.1 问题原材料夹杂物分析

取问题原材料进行夹杂物检测，见图 2。原材料含有超标大尺寸脆性夹杂物，不符合 GJB 1951—1994^[1] 要求。

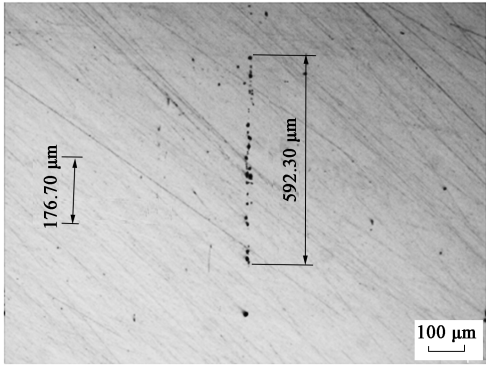


图 2 问题原材料夹杂物形貌
Fig. 2 Morphology of inclusions in raw material with problems

1.2 原材料冲击性能试验

取问题原材料与正常原材料（采购时明确要求电渣钢，夹杂物严格控制）经同一热处理制度（800 ℃油淬，160 ℃回火空冷）^[2] 后制作冲击试样，进行对比试验，结果见表 1。

表 1 冲击试验数据（J）
Table 1 Date of impact test（J）

序号	横向冲击性能		纵向冲击性能	
	问题原材料	正常原材料	问题原材料	正常原材料
1	38.5	64.8	102.4	117.2
2	31.6	73.4	91.3	106.5
3	24.0	68.1	101.4	103.7
4	27.1	68.3	91.9	101.9
平均值	32.8	68.9	96.8	107.3
GJB 1951—1994 ^[1] 要求	—	—	≥78	≥78

横向、纵向冲击性能各试验了 4 组数据，结果发现：问题原材料的纵向冲击性能的平均值为 96.8 J，比正常原材料略低，但满足 GJB 1951—1994^[1] 标准不小于 78 J 的要求；问题原材料的横向冲击性能检测结果为 32.8 J，为正常原材料的 47.6%，最小值为 24.0 J，仅达到正常原材料的 34.8%。

1.3 锻造后冲击性能试验

对问题原材料和正常原材料分别按上述锻造工艺

进行加工。锻造前后横向冲击性能试验结果见表 2。可见锻造工艺对正常原材料和问题原材料的冲击性能均有改善作用。其中正常原材料的横向冲击性能提高了 8%，问题原材料的横向冲击性能平均值从 32.4 J 提升至 56.6 J，提升幅度达到 75%。GJB 1951—1994^[1] 标准中未给出 12Cr2Ni4A 钢材料的横向冲击性能，参照 18Cr2Ni4WA 钢材料横向冲击性能要求：横向冲击性能 ≥ 39 J，纵向冲击性能与 12Cr2Ni4A 钢一致，要求纵向冲击性能 ≥ 78 J。问题原材料锻造后的横向冲击性能超出了 18Cr2Ni4WA 钢材料横向冲击性能下限 45%。

表 2 锻造前后材料横向冲击性能结果对比（J）
Table 2 Comparison of transverse impact property results of material before and after forging（J）

序号	问题原材料		正常原材料	
	锻造前	锻造后	锻造前	锻造后
1	38.5	53.7	64.8	75.3
2	38.6	54.3	66.5	68.1
3	27.1	54.6	68.3	74.1
4	27.4	55.9	71.1	71.1
5	24.0	63.3	68.1	75.0
6	38.8	57.9	68.8	78.1
平均值	32.4	56.6	67.9	73.6

1.4 原材料冲击断口形貌比对

对问题原材料与正常原材料的冲击断口在扫描电镜相同倍数下进行比对，形貌存在明显差异，见图 3~图 4，问题原材料的断口形貌中可见大量条状的夹杂物，而正常原材料中的条状夹杂物的数量明显较问题原材料少。

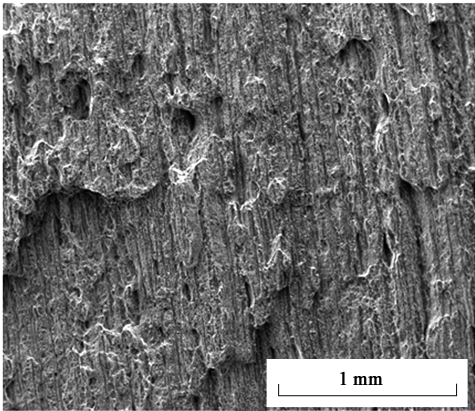


图 3 问题原材料断口
Fig. 3 Fracture of raw material with problems

1.5 锻造后断口形貌对比

对问题原材料锻造后的冲击试样进行断口形貌

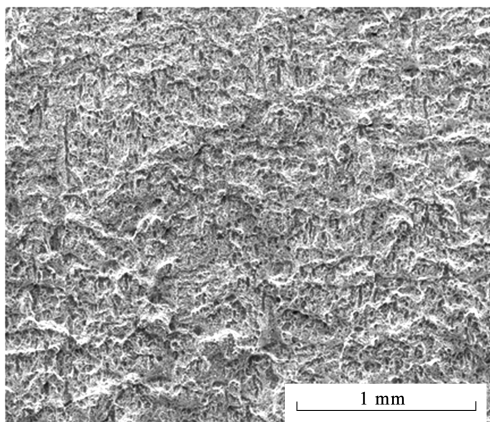


图 4 正常原材料断口

Fig. 4 Fracture of normal raw material

分析, 锻造后断口的条状夹杂物的分布明显改善, 基本为等轴韧窝形貌, 带状形貌基本消失。较长的夹杂物得以碎化, 见图 5, 未见明显的非金属夹杂物, 形貌见图 6, 与正常原材料锻造后的断口形貌 (图 7) 相比未见差异。

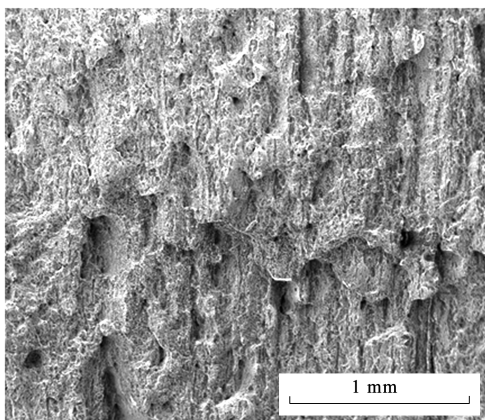


图 5 问题原材料锻造后断口

Fig. 5 Fracture of raw material with problems after forging

1.6 锻造对问题原材料非金属夹杂物分布的影响

问题原材料锻造后进行非金属夹杂检测, 未见明显夹杂物。按 GB/T 10561—2005^[3] 标准进行评级, 符合标准要求, 见图 8。

2 分析与讨论

齿轮钢由于具有特殊用途, 在性能上的要求极其严格, 要求钢材具有较强的抗疲劳能力, 必须对钢中夹杂物进行严格控制^[4-5]。钢在冶炼过程中, 氧气及其他气体大量溶解在液态钢中, 为防止气体的有害作用, 加入脱氧元素, 形成复杂的夹杂物,

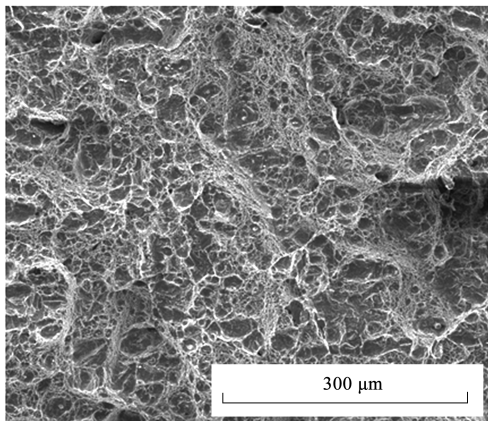


图 6 问题原材料锻造后断口放大图

Fig. 6 Enlarged view for fracture of raw material with problems after forging

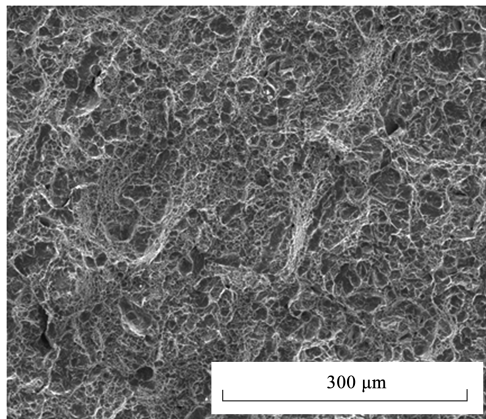


图 7 正常原材料锻造后断口

Fig. 7 Fracture of normal raw material after forging

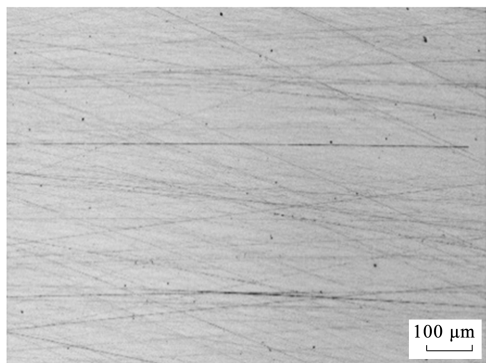


图 8 问题原材料锻造后的夹杂物

Fig. 8 Inclusions of raw material with problems after forging

这些夹杂物大部分在钢液凝固前作为炉渣浮出。但总有一部分残留在钢中, 形成钢中的夹杂物^[6]。国际钢协认为: 当夹杂物直接或间接影响产品的生产性能或使用性能时, 该钢则不是洁净钢; 如果没有影响, 可认为是洁净钢^[7]。

夹杂物影响力学性能的根源,是由于夹杂物破坏了基体的连续性,起到相当于钢中裂纹的作用^[8]。尺寸大的脆性夹杂物对疲劳的影响大,而且强度越高,危害性越大^[9]。夹杂物尺寸越大,疲劳寿命越低^[10]。经过以上检测和工艺试验结果可见,问题原材料中含有的大尺寸脆性夹杂物使横向冲击性能仅为正常原材料的 47.6%,最小值为 24.0 J,仅达到正常原材料的 34.8%。问题原材料的横向冲击性能远低于正常原材料的横向冲击性能,是齿轮早期断裂的直接原因。

对于钢锭或锻件坯料内部尺寸较大的夹杂物而言,必须在锻造环节通过热变形将其破碎^[11]。锻造过程必须保证充足的变形量^[12],所产生的另一型齿轮采用了较大的锻造比,锻造比越大,锻件的变形程度就越高,变形程度直接关系到材料最终夹杂物的尺寸。锻造后断口形貌基本为等轴韧窝形貌,带状形貌基本消失。锻造后夹杂物的分布明显改善,条状夹杂物已破碎,未见大尺寸超标夹杂物,夹杂物已呈弥散分布,夹杂物评级符合标准要求。

经过锻造后,问题原材料的横向冲击性能大大改善,效果显著,提升幅度达到 75%,超出 18Cr2Ni4WA 钢的横向冲击性能标准要求值下限 45%。通过以上分析,问题原材料经锻造后,已达到正常原材料的水平,可满足零件使用要求。

3 结论

(1) 锻造使问题原材料的横向冲击性能显著改善,提升了 75%。

(2) 锻造改善了夹杂物的分布,大尺寸条状夹杂物破碎后呈细小弥散分布,符合标准要求。

(3) 锻造改善了断口形貌,条状夹杂物形貌基本消失,呈等轴韧窝形貌。

(4) 锻造后问题原材料的横向冲击性能、夹杂物分布已达到正常原材料的性能,锻造零件可正常使用。

参考文献:

- [1] GJB 1951—1994, 航空用优质结构钢棒规范 [S].
GJB 1951—1994, Specification for quality structure steel bars for aviation [S].
- [2] 赵振业,姚俊臣,丁传富,等. 中国航空材料手册(第1卷) [M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
Zhao Z Y, Zhao X C, Ding C F, et al. China Aeronautical Materials Handbook (Volume 1) [M]. Beijing: China Standards Press, 2002.
- [3] GB/T 10561—2005, 钢中非金属夹杂物含量的测定标准评级图显微检验法 [S].
GB/T 10561—2005, Steel—Determination of content of non-metallic inclusions—Micrographic method using standards diagrams [S].
- [4] 赵沛,成国光,沈甦. 炉外精炼及铁水预处理实用技术手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
Zhao P, Cheng G G, Shen S. Secondary Refining & Iron Water Pretreatment Practical Technical Manual [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004.
- [5] 杨勇,刘浏,崔京玉. 转炉生产 20CrMnTi 齿轮钢中夹杂物及相分析研究 [J]. 钢铁, 2010, (10): 41–46.
Yang Y, Liu L, Cui J Y. Study on inclusions and phase analysis of BOF produced 20CrMnTi gear steel [J]. Iron and Steel, 2010, (10): 41–46.
- [6] 李炯辉,林德成,丁惠麟,等. 金属材料金相图谱 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
Li J H, Lin D C, Ding H L, et al. Metallographic Atlas of Metal Materials [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [7] 薄鑫涛. 非金属夹杂物评定类别 [J]. 热处理, 2013, 28 (5): 26.
Bo X T. Evaluate category of non-metallic inclusions [J]. Heat Treatment, 2013, 28 (5): 26.
- [8] 乙继海,王杰,刘贺. 45Cr4NiMoV 支乘辊轴颈根部裂纹原因分析 [J]. 一重技术, 2011, (2): 27–30.
Yi J H, Wang J, Liu H. Crack cause analysis happened on root of 45Cr4NiMoV back-up roll neck [J]. CFHI Technology, 2011, (2): 27–30.
- [9] 王春芳,李继康,王哲. 50CrVA 电机轴断裂原因分析 [J]. 物理测试, 2020, 38 (5): 9–13.
Wang C F, Li J K, Wang Z. Analysis on fracture cause of 50CrVA motor shaft [J]. Physics Examination and Testing, 2020, 38 (5): 9–13.
- [10] 管晨冉,杨卯生,高鹏. 32Cr3MoVE 轴承钢旋弯疲劳特性及裂纹萌生扩展行为 [J]. 钢铁研究学报, 2020, 32 (10): 916–924.
Guan C R, Yang M S, Gao P. Rotary bending fatigue characteristics and crack initiation and propagation behavior of 32Cr3MoVE bearing steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020, 32 (10): 916–924.
- [11] 杨帅,张启飞,卢昀,等. 氧化铝夹杂破碎与弥散行为的试验研究 [J]. 机械工程学报, 2021, 57 (22): 172–183.
Yang S, Zhang Q F, Lu Y, et al. Experimental study on crushing and dispersion behavior of alumina inclusions [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57 (22): 172–183.
- [12] 张跃,王岩,张灵宇,等. 第三代核电蒸汽发生器管板锻件制造工艺 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (10): 44–48.
Zhang Y, Wang Y, Zhang L Y, et al. Manufacturing process on tube plate forging for the third generation nuclear steam generator [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (10): 44–48.